



Fizika II

ELEKTRIČNA STRUJA

ELEKTRIČNA STRUJA

Elektrostatika - proučava naboje u mirovanju (ravnoteži).

Elektrodinamika - proučava pojave vezane uz naboje u gibanju.

Električna struja = usmjereno gibanje električnih naboja pod utjecajem električnog polja.

Nosioci naboja:

- ▶ U metalima - slobodni elektroni.
- ▶ U elektrolitima i plinovima - pozitivni i negativni ioni.

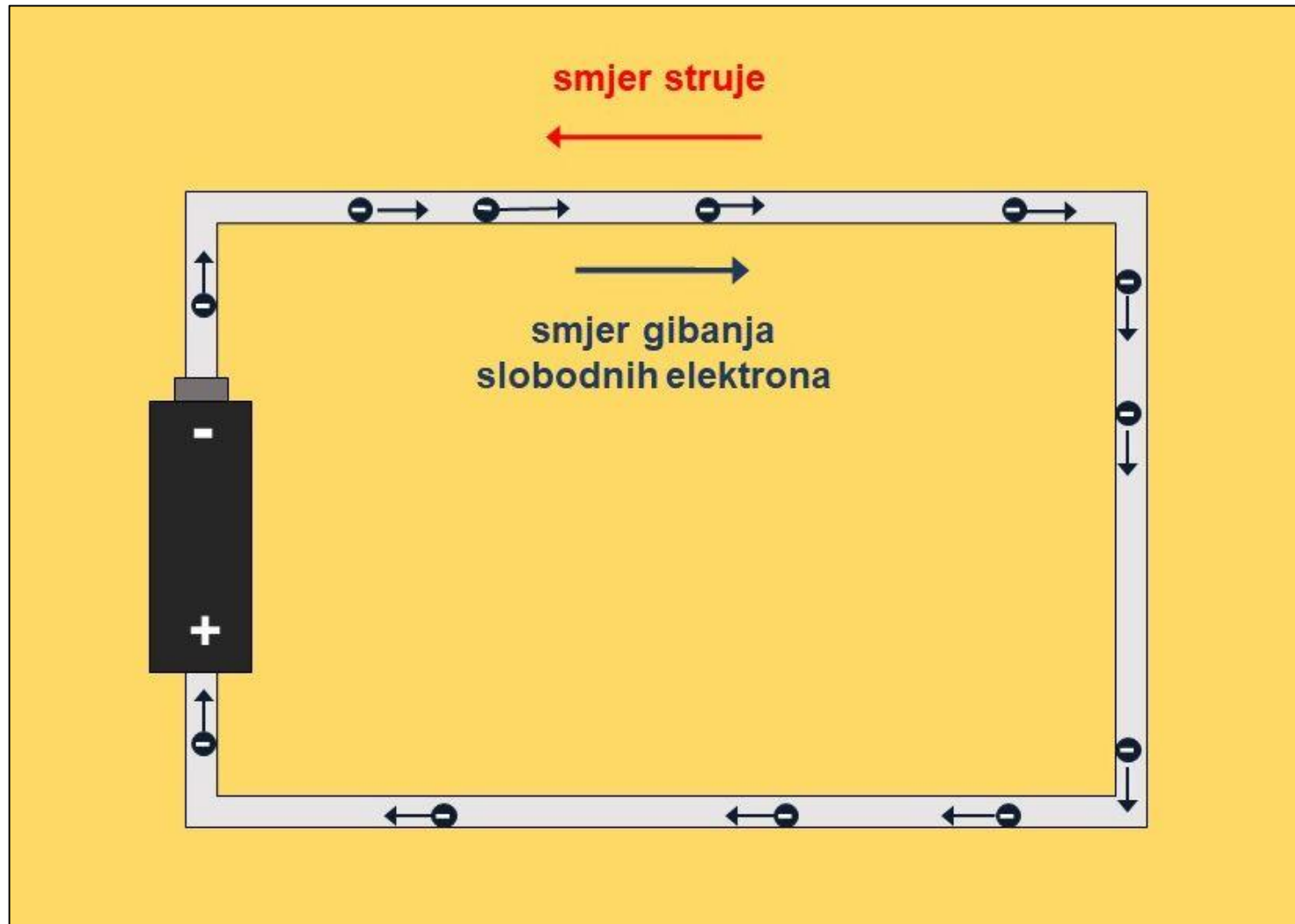
Električno polje (tj. razlika potencijala) tjera naboje na gibanje.

Ako električno polje zadržava isti smjer (a jakost se može mijenjati)

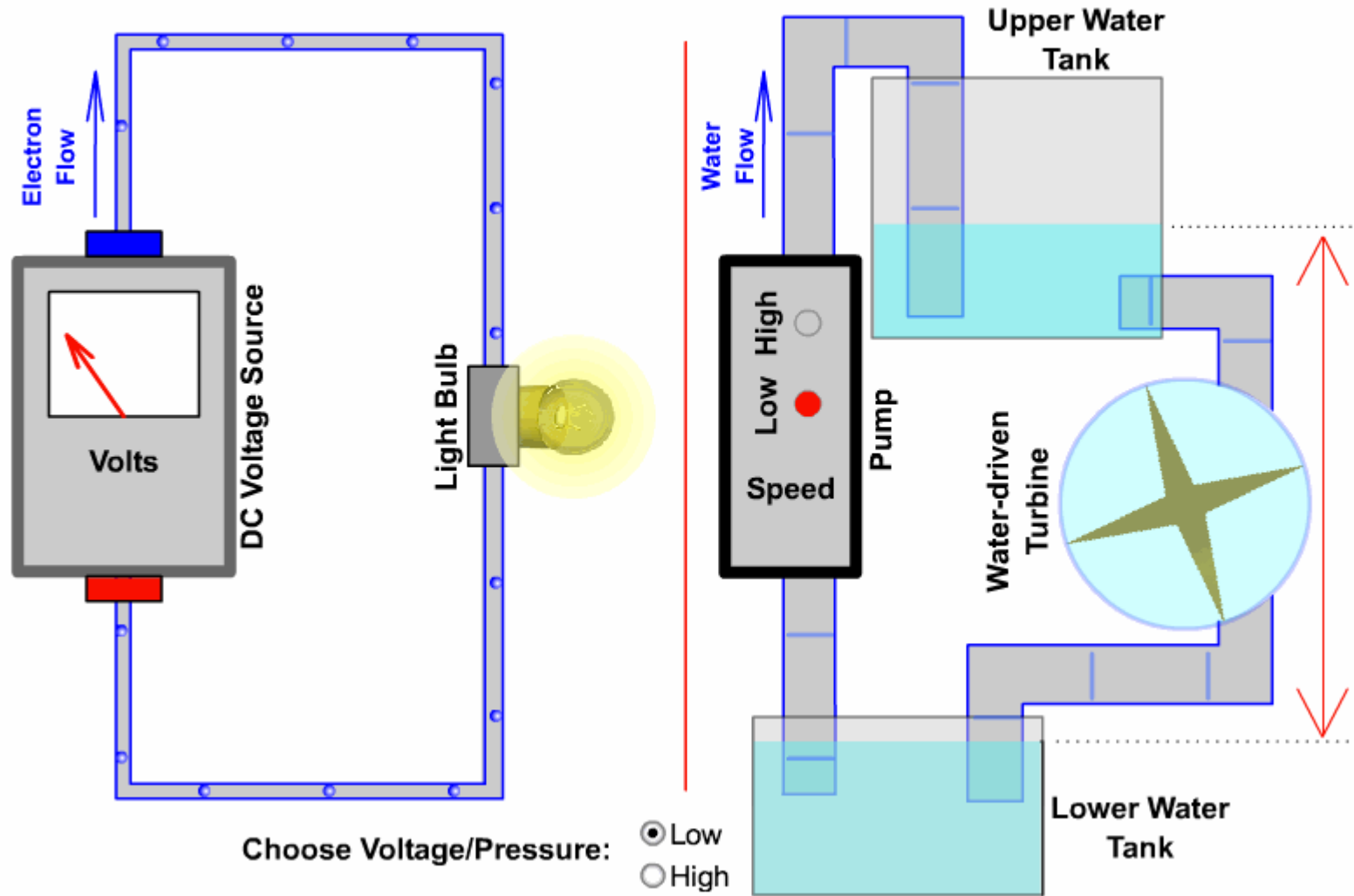
→ Istosmjerna struja → Smjer struje uvijek je isti.

Ako električno polje mijenja smjer djelovanja u vremenu →

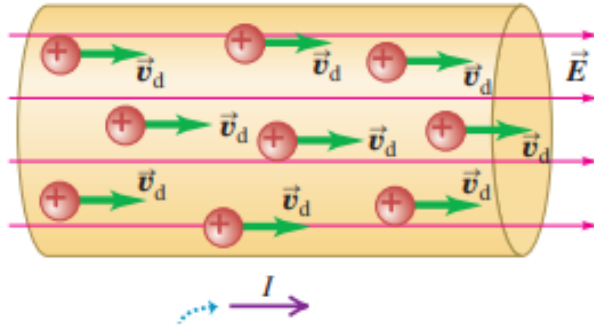
Izmjenična struja → Smjer struje se mijenja u vremenu.



Comparing a DC Circuit to the Flow of Water

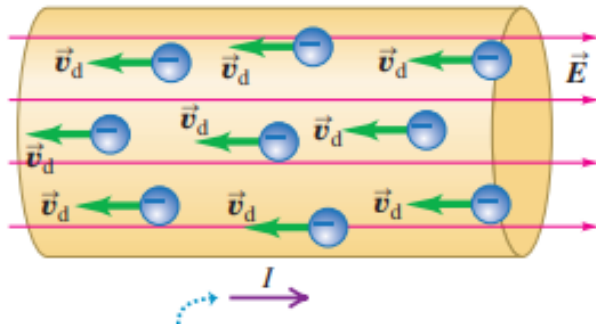


Električna struja



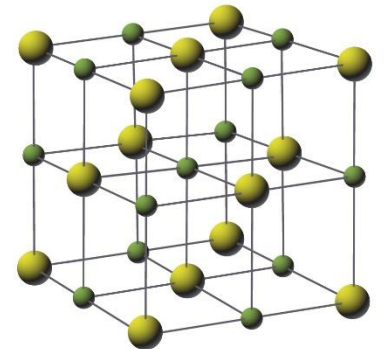
Smjer struje = smjer el. polja

- Smjer struje je u smjeru električnog polja
= smjer gibanja **+** naboja.



Iako su u metalnim vodičima elektroni
nosioci naboja, smjer struje = smjer
gibanja poz. naboja.

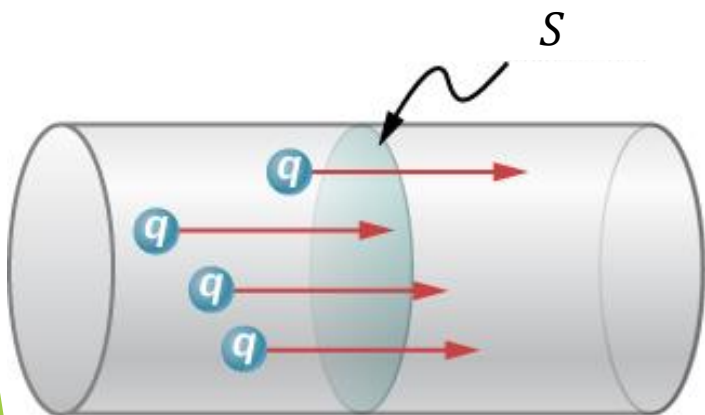
- Elektroni, negativno nabijeni, gibaju se u
suprotnom smjeru.



Električna struja

- **Jakost struje** I = omjer električnog naboja Q i vremena t potrebnog da taj naboj prođe kroz neki presjek vodiča.

$$I = \frac{Q}{t}$$



- Ako je struja promjenjiva:

$$I = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta Q}{\Delta t} = \frac{dQ}{dt} (= i)$$

- Mjerna jedinica za jakost struje je amper, $A = \frac{C}{s}$
- Amper - osnovna jedinica SI sustava.

„Uređaj”	baterija	akumulator	Str. krug: radio, TV	Str. krug računala
Struja / A	0,5 - 1	200	~1 mA, 1μA	~1 nA, 1pA

Gustoća struje

- ▶ **Gustoća struje J** (kad je struja jednoliko raspoređena po presjeku vodiča S) = omjer jakosti električne struje I i presjeka vodiča S :

$$J = \frac{I}{S}$$

- ▶ **vektorska veličina!** – smjer? – smjer gibanja pozitivnog naboja
 - Ako gustoća struje nije konstantna po cijelom presjeku:

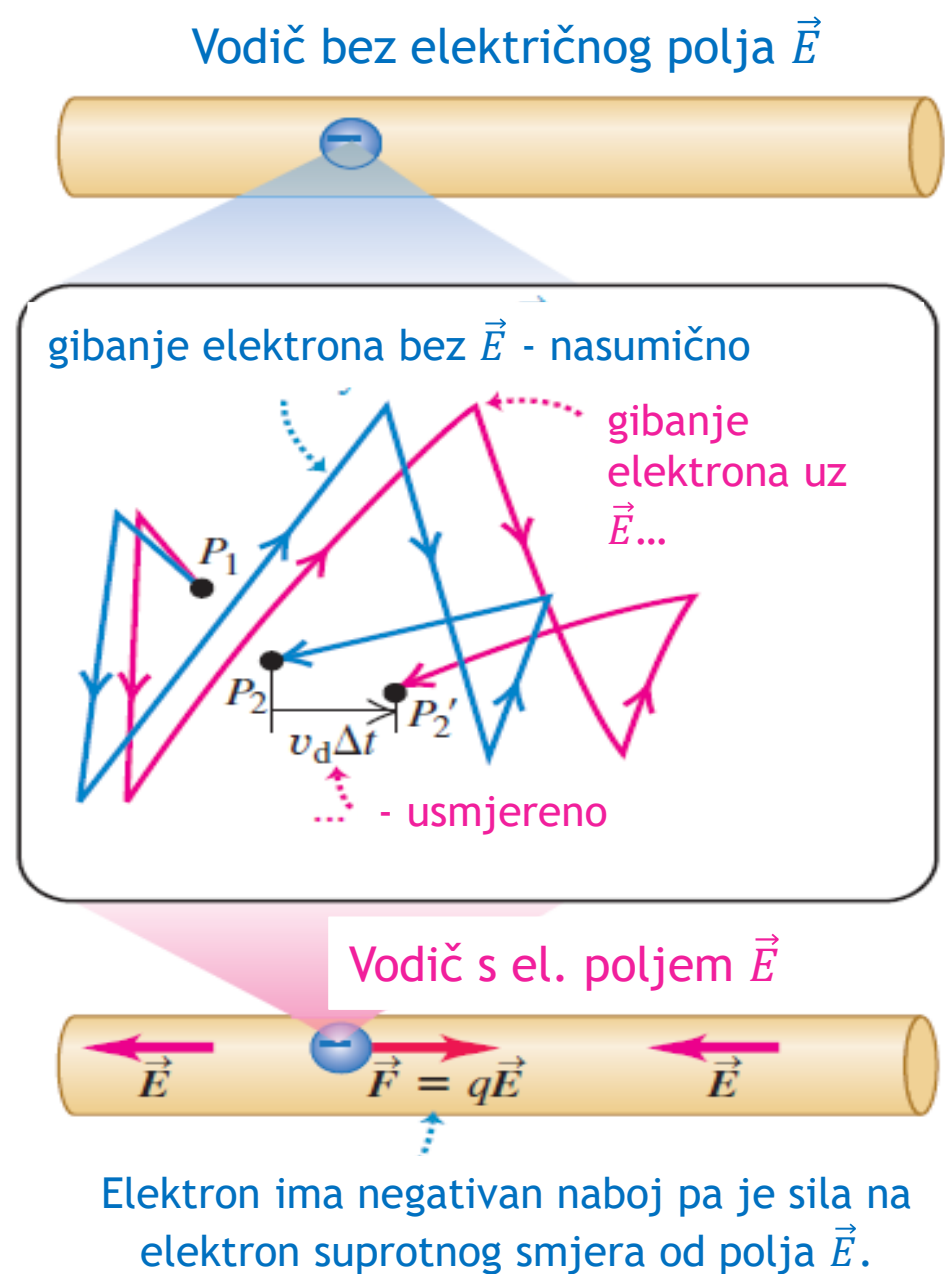
$$dI = \vec{J} \cdot d\vec{S} \rightarrow I = \iint_S \vec{J} \cdot d\vec{S}$$

Vektor elementa površine, ima smjer normale na površinu

	Bakreni vodovi	Volframova nit žarulje	Namotaji strojeva
Tipična vrijednost gustoće struje (A/mm ²)	< 10	~ 400	< 4

Mikroskopski opis struje

- ▶ Ako nema električnog polja ($\vec{E} = 0$) naboji se u vodiču gibaju kaotično, podjednako u svim smjerovima, $\langle \vec{v} \rangle = 0$.
- ▶ Ako uključimo vanjsko električno polje ($\vec{E} \neq 0$), naboji se gibaju usmjereno:
 $\langle \vec{v} \rangle = \vec{v}_d$ – driftna brzina
- ▶ Termička brzina elektrona u vodičima je reda veličine 10^6 m/s, dok je driftna brzina reda veličine 10^{-4} m/s.



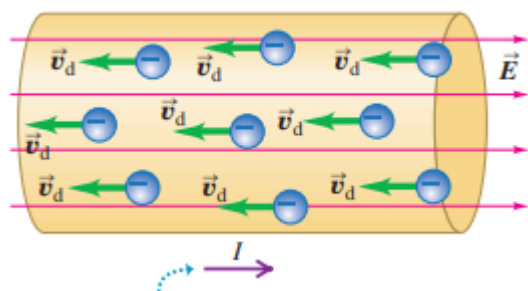
Mikroskopski opis struje

- ▶ Pod utjecajem električnog polja $\vec{E}$ slobodni elektroni se ubrzavaju između sudara s atomima kristalne rešetke, u sudarima gube energiju.
- ▶ Interakcija elektrona s titranjem kristalne rešetke djeluje slično viskoznom trenju:

$$\vec{F}_{tr} = -b\vec{v}_d$$

b - konstanta proporcionalnosti, ovisi o vrsti nosilaca naboja i kristalnoj rešetki

- ▶ Elektron se giba konstantnom brzinom $\vec{v}_d \xrightarrow{\text{I.N.z.}}$ zbroj sila na elektron jednak je nuli:



$$\vec{F}_{el} + \vec{F}_{tr} = 0$$

$$-e\vec{E} - b\vec{v}_d = 0$$

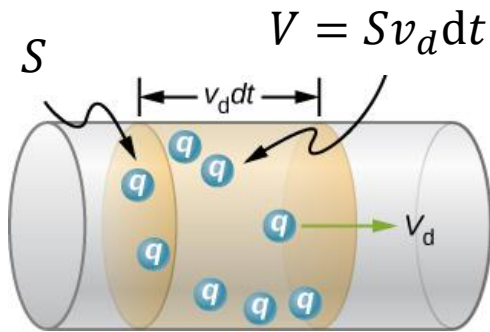
$-e$ - naboj elektrona

$$v_d = -\frac{e}{b}E = \mu_{el}E$$

μ_{el} - pokretljivost elektrona

Mikroskopski opis struje

- Želimo povezati jakost i gustoću struje s driftnom brzinom elektrona.



- n - koncentracija nosioca naboja (broj nabijenih čestica po jedinici volumena).
- Sve čestice gibaju se brzinom v_d .
- U vremenu dt svaka čestica prijeđe put $v_d dt$.
- Čestice koje u vremenskom intervalu dt prođu kroz površinu S su čestice koje se na početku tog intervala nalaze u cilindru volumena V .
- Ukupni naboj koji u vremenu dt prostruji kroz S : $dQ = nqSv_d dt$
- Jakost struje: $I = \frac{dQ}{dt} = nqSv_d$
- Gustoća struje: $J = \frac{I}{S} = nqv_d$

$$\vec{J} = -ne\vec{v}_d = -ne\mu_{el}\vec{E}$$

Vektorski zapis
za elektrone

Mikroskopski opis struje

$$\vec{J} = nq\vec{v}_d = nq\mu_{el}\vec{E}$$

- ▶ Gustoća struje uvijek je u smjeru električnog polja!
- ▶ Bitno kod elektrolita - imamo obje vrste nosioca naboja

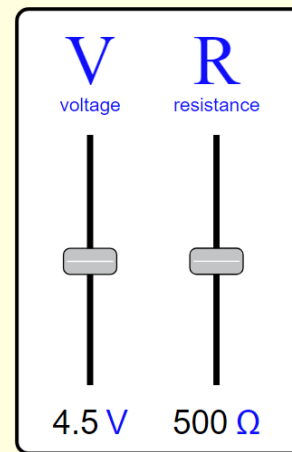
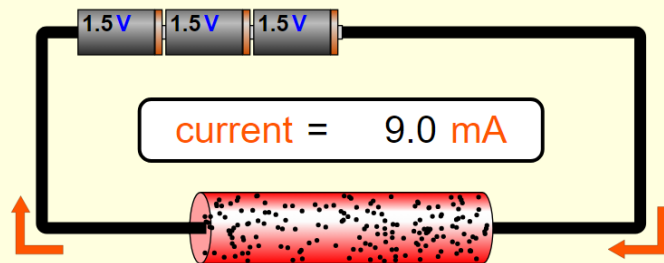


Primjer: otopina soli

- Nosioči struje su i pozitivni naboji (Na^+ ioni) i negativni naboji (Cl^- ioni).
- Ukupna struja I zbroj je struja koje stvara svaka vrsta nabijenih čestica.
- Ukupna gustoća struje $\vec{J}$ zbroj je doprinosa svake vrste naboja.

Simulacija: Ohmov zakon

$$V = I R$$



Električni otpor, Ohmov zakon

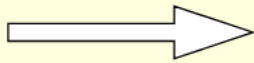
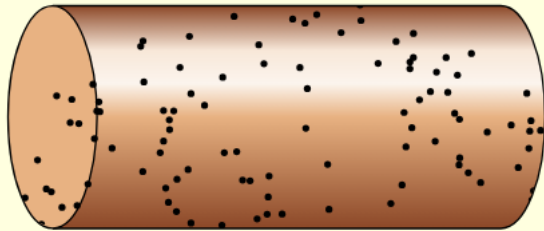
- ▶ **Ohmov zakon** – jakost struje kroz vodič pri konstantnoj temperaturi razmjerna je naponu na njegovim krajevima.

$$I = \frac{U}{R}$$

- ▶ R – električni otpor vodiča $[R] = \Omega = \frac{V}{A}$ om
- ▶ **Omski otpori** – materijali za koje je napon U linearna funkcija struje I . Materijali za koje je otpor R konstantan (pri promjeni struje): **vodiči**.
- ▶ **Neomski otpori** – materijali, odnosno elektronički elementi za koje struja nije razmjerna naponu (imaju nelinearne karakteristike) → ne vrijedi Ohmov zakon: **diode**.

Simulacija: Ovisnost otpora

$$R = \frac{\rho l}{A}$$



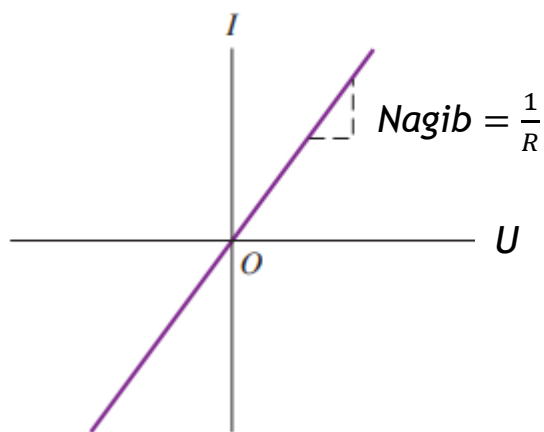
$R = 0.667 \text{ ohm}$

ρ otpornost	l duljina	A ploština
0.50 Ωcm	10.00 cm	7.50 cm^2

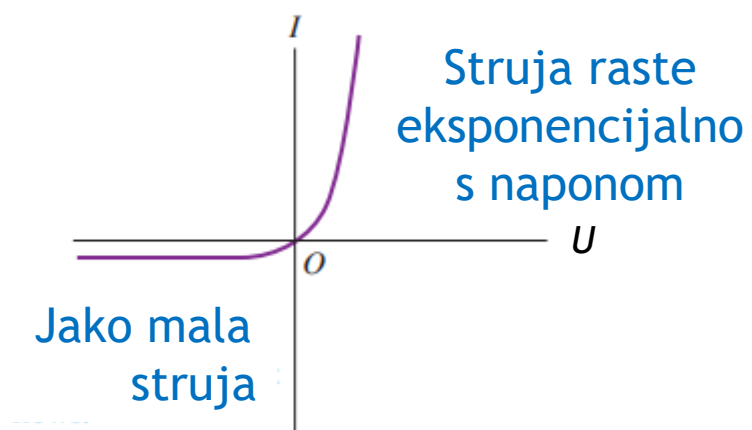


Električni otpor, Ohmov zakon

Omski otpornik - metalni vodič



Neomski otpornik - poluvodička dioda



- Električna otpornost materijala, ρ :

$$R = \rho \frac{l}{S}$$

$$[\rho] = \Omega \text{m}$$

- Električna vodljivost, G : $G = \frac{1}{R}$ $[G] = S = \Omega^{-1} = \frac{A}{V}$ simens

- Električna provodnost, κ : $\kappa = \frac{1}{\rho}$ $[\kappa] = S/m = \Omega^{-1} \text{m}^{-1}$

Električni otpor, Ohmov zakon

Obzirom na vrijednost električne otpornosti, materijale dijelimo na:

- Vodiče
- Poluvodiče
- Izolatore

Substance		$\rho \ (\Omega \cdot \text{m})$	Substance		$\rho \ (\Omega \cdot \text{m})$
Conductors			Semiconductors		
Metals	Silver	1.47×10^{-8}	Pure carbon (graphite)	3.5×10^{-5}	
	Copper	1.72×10^{-8}	Pure germanium	0.60	
	Gold	2.44×10^{-8}	Pure silicon	2300	
	Aluminum	2.75×10^{-8}			
	Tungsten	5.25×10^{-8}	Insulators		
	Steel	20×10^{-8}	Amber	5×10^{14}	
	Lead	22×10^{-8}	Glass	$10^{10} - 10^{14}$	
	Mercury	95×10^{-8}	Lucite	$> 10^{13}$	
	Manganin (Cu 84%, Mn 12%, Ni 4%)	44×10^{-8}	Mica	$10^{11} - 10^{15}$	
Alloys	Constantan (Cu 60%, Ni 40%)	49×10^{-8}	Quartz (fused)	75×10^{16}	
	Nichrome	100×10^{-8}	Sulfur	10^{15}	
			Teflon	$> 10^{13}$	
			Wood	$10^8 - 10^{11}$	

Mikroskopski oblik Ohmovog zakona

$$I = \frac{U}{R} \quad \text{Makroskopski oblik Ohmovog zakona} \quad R = \rho \frac{l}{S}$$

$$J = \frac{I}{S} = \frac{U}{RS} = \frac{U}{\rho \frac{l}{S} S} = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}$$

$$J = \kappa E$$

Mikroskopski oblik Ohmovog zakona

$$\left. \begin{array}{l} J = ne\mu_{el}E \\ J = \kappa E \end{array} \right\} \quad \kappa = ne\mu_{el}$$

Ovisnost otpora o temperaturi (metali)

- ▶ Otpor materijala ovisi o temperaturi

$$\alpha = \frac{1}{R} \frac{\Delta R}{\Delta T} = \frac{1}{\rho} \frac{\Delta \rho}{\Delta T}$$

- ▶ α – temperaturni koeficijent otpora – pokazuje kolika je relativna promjena otpora pri promjeni temperature za jedan kelvin

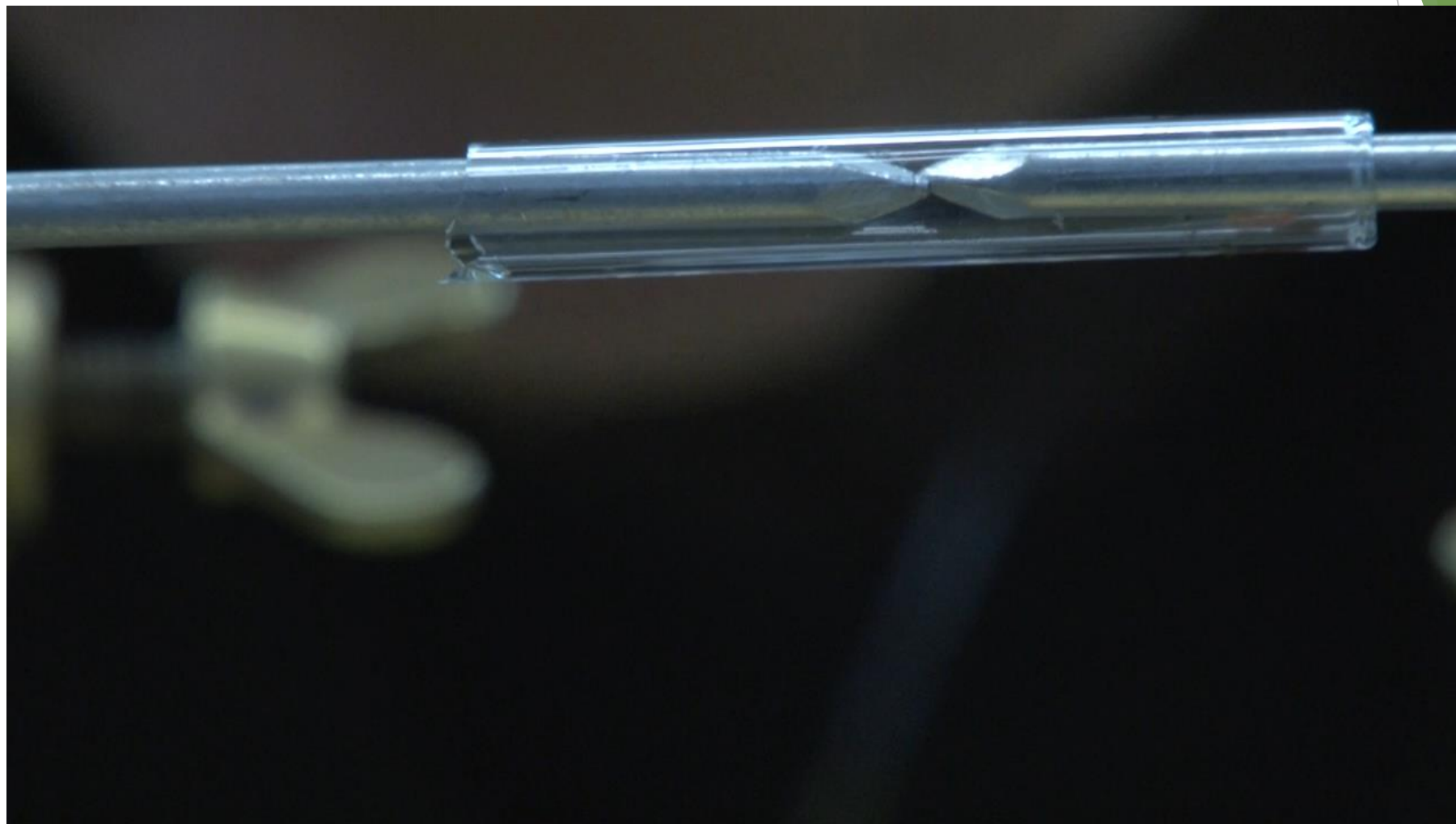
$$R_2 = R_1(1 + \alpha \Delta T)$$

- ▶ Slično se mijenja i električna otpornost:

$$\rho_2 = \rho_1(1 + \alpha \Delta T)$$

Zakon dobro vrijedi za čiste metale u području od 0 °C do 100 °C:

$$\alpha \approx \frac{1}{250} \text{ K}^{-1}$$

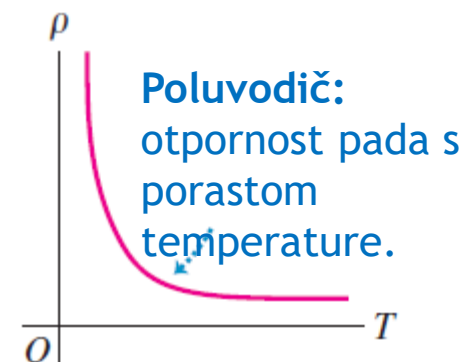
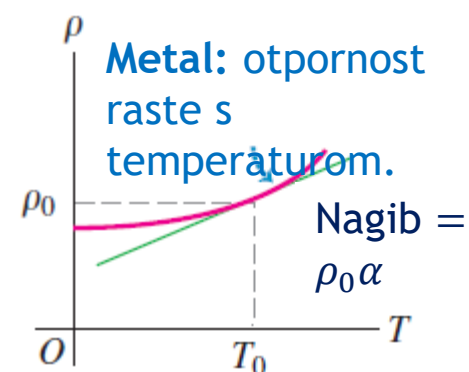


Ovisnost otpora o temperaturi

- Temperaturni koeficijent otpora na sobnoj temperaturi.

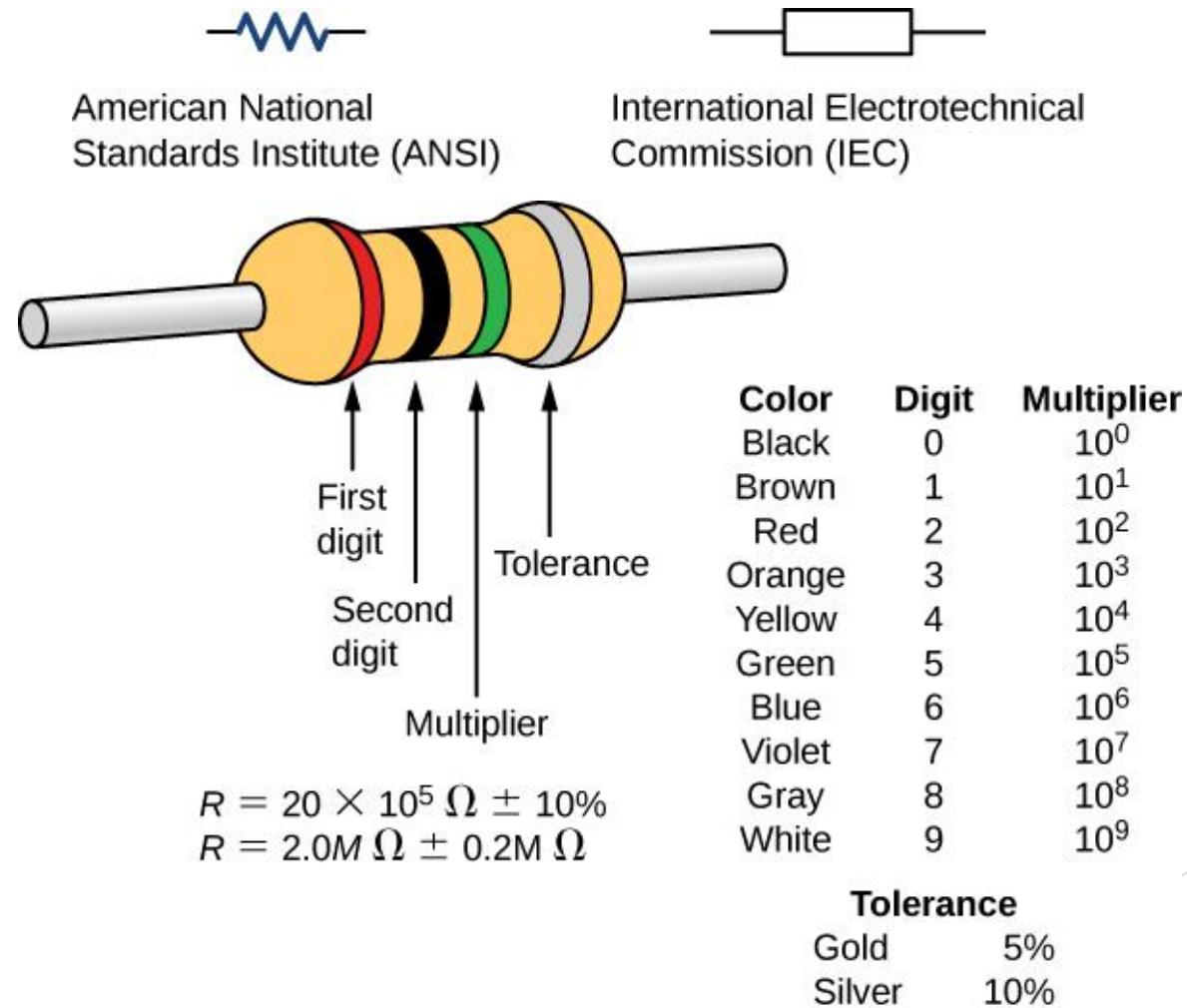
Material	$\alpha [(\text{°C})^{-1}]$	Material	$\alpha [(\text{°C})^{-1}]$
Aluminum	0.0039	Lead	0.0043
Brass	0.0020	Manganin	0.00000
Carbon (graphite)	-0.0005	Mercury	0.00088
Constantan	0.00001	Nichrome	0.0004
Copper	0.00393	Silver	0.0038
Iron	0.0050	Tungsten	0.0045

- Metali: Otpor (i otpornost) raste s temperaturom
- Poluvodiči: Otpor (i otpornost) smanjuje se s temperaturom



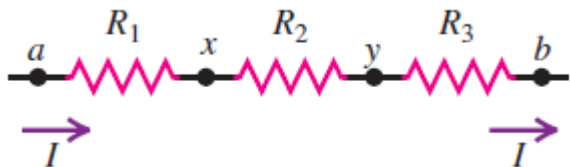
Otpornici

- Jedna od najčešće upotrebljavanih elektroničkih komponenata



Spajanje otpornika

Serijski spoj otpornika



- Kroz sve otpornike prolazi **jednaka** struja.

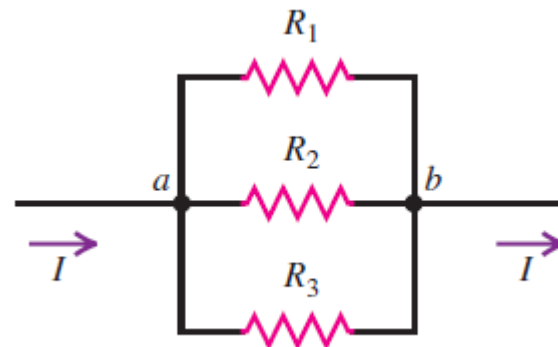
$$U = U_1 + U_2 + U_3$$

$$U = IR_1 + IR_2 + IR_3 = IR$$

$$R = R_1 + R_2 + R_3$$

$$R = \sum_{i=1}^n R_n$$

Paralelni spoj otpornika



- U sve tri grane je **jednak** napon.
- U točki a struja se grana na tri dijela.

$$I = I_1 + I_2 + I_3$$

$$I = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} + \frac{U}{R_3} = \frac{U}{R}$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}$$

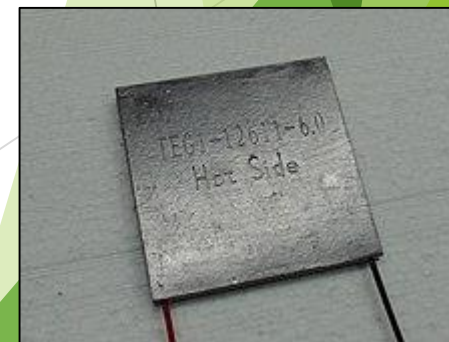
$$\frac{1}{R} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{R_n}$$

Elektromotorna sila

Električni izvori su uređaji kojima se može održavati razlika potencijala (napon) u strujnom krugu.

Električna energija u izvorima dobiva se na račun drugih oblika energije:

- ▶ Električni generatori (Van de Graaff)
- ▶ mehanička energija
- ▶ Galvanski članci i akumulatori
- ▶ kemijska energija
- ▶ Fotoćelije
- ▶ sunčeva energija
- ▶ Termočlanci
- ▶ toplina

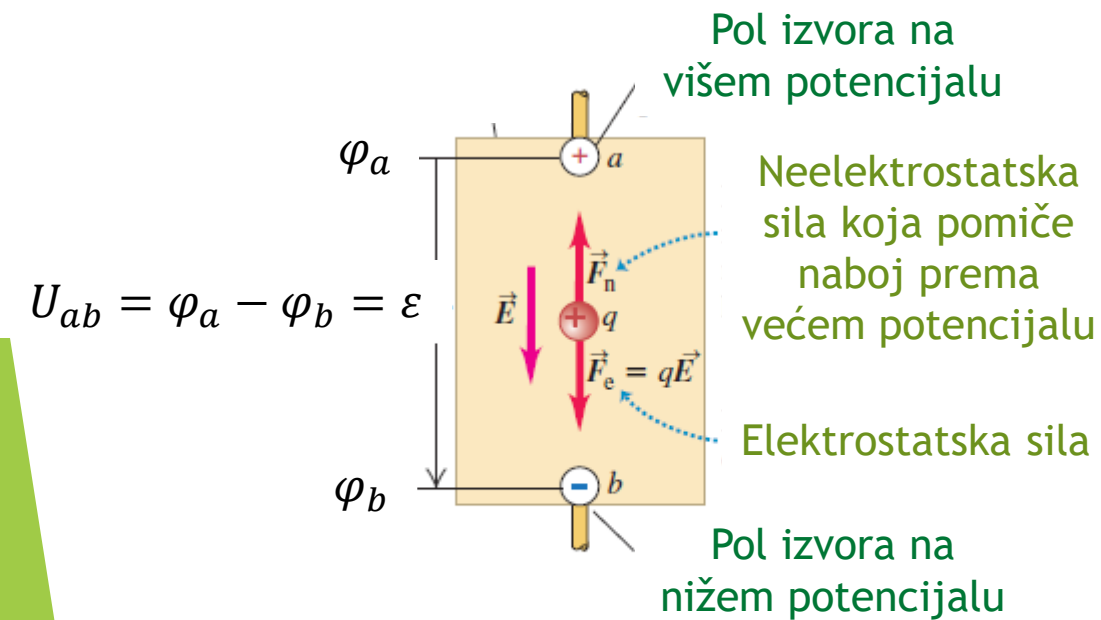


Svaki realni izvor karakteriziraju dvije fizikalne veličine:

- ▶ R_u – unutarnji otpor izvora
- ▶ ε – *elektromotorna sila*, NIJE SILA već unutarnji napon izvora

Elektromotorna sila - idealni izvor

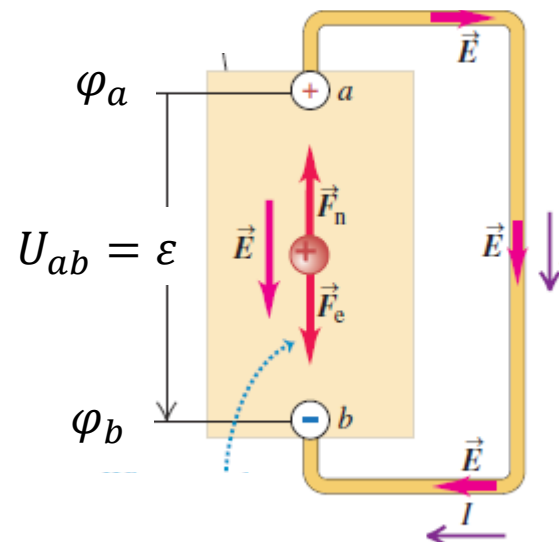
Idealni izvor u **otvorenom** strujnom krugu



Kad na idealni izvor nije spojeno trošilo nema struje i $F_n = F_e$

Idealni izvor u **zatvorenom** strujnom krugu

Razlika potencijala između polova stvara električno polje koje pomiče naboje



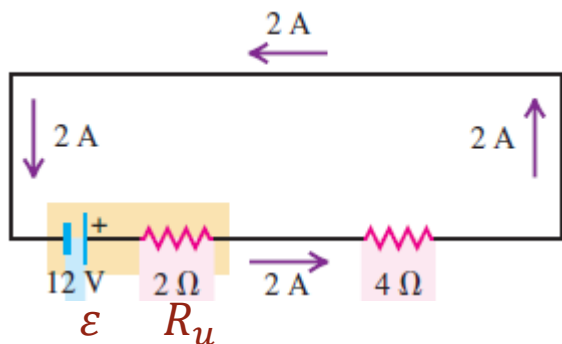
Idealni izvor, i dalje $F_n = F_e$.
Za realni izvor bit će $F_n > F_e$

$$\varepsilon = U_{ab} = IR$$

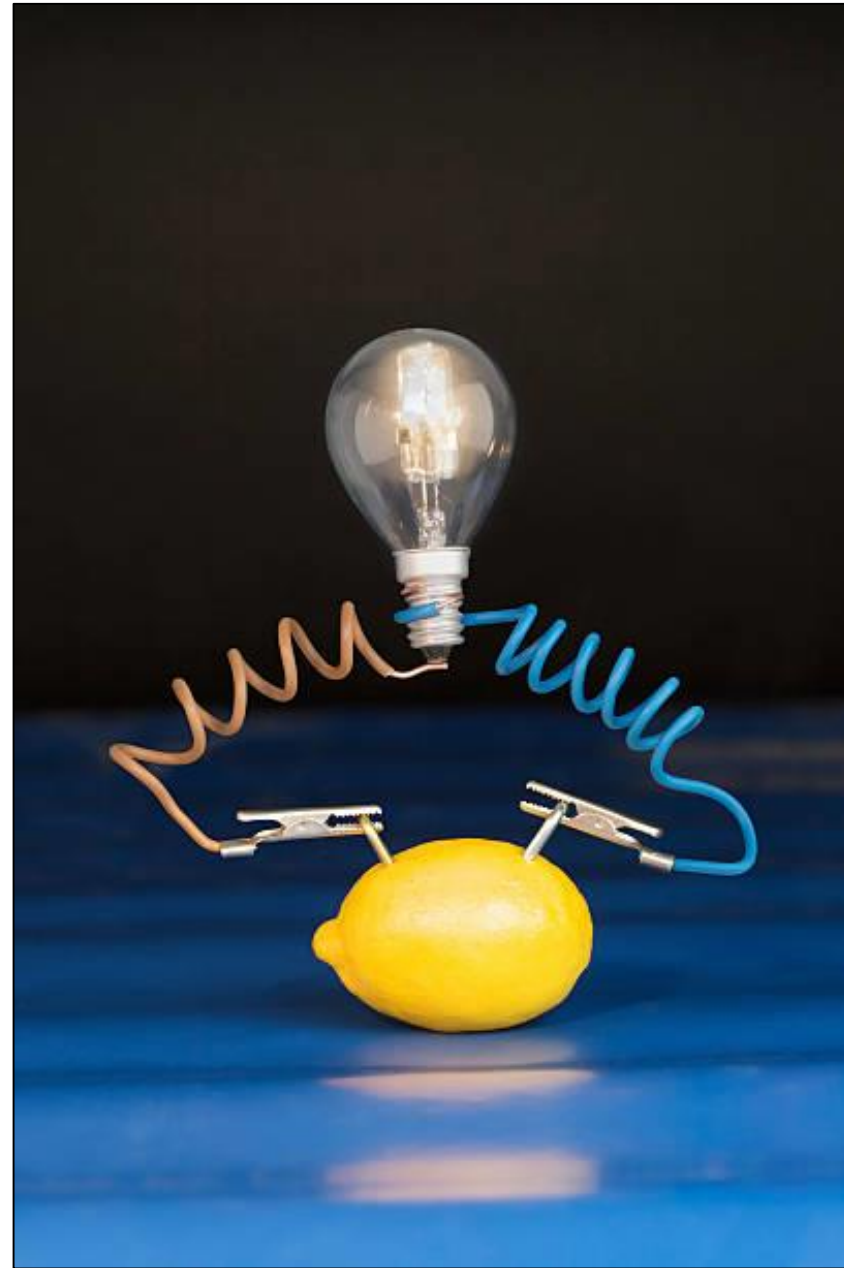
Elektromotorna sila - realni izvor

- ▶ Realni izvor posjeduje unutarnji otpor R_u .
- ▶ Napon na krajevima (polovima) izvora nije jednak elektromotornoj sili, umanjuje se za pad napona na unutarnjem otporu.

$$U = \varepsilon - IR_u$$

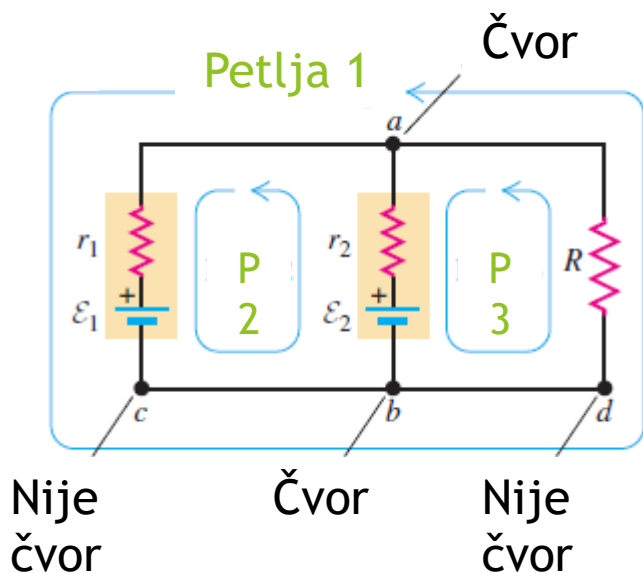


- Elektromotorna sila, tj. napon na krajevima baterije je 12 V - kad nije spojena na trošilo.
- Budući da baterija posjeduje unutarnji otpor, napon na krajevima baterije je manji od 12 V kad se spoji na žarulju.



Kirchhoffova pravila

- Za rješavanje složenijih strujnih krugova, moramo upotrijebiti Kirchhoffova pravila.



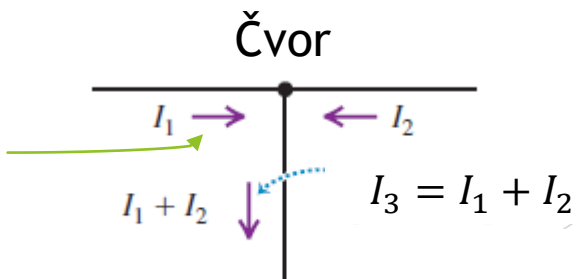
1. Kirchhoffovo pravilo:

- Zbroj svih struja u nekom čvoru jednak je nuli

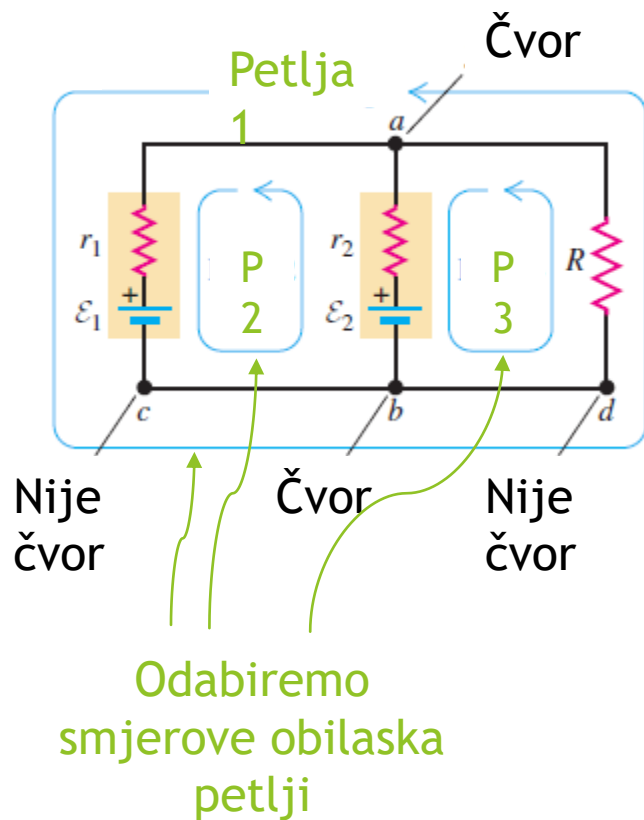
$$\sum_i I_i = 0$$

- Struje koje ulaze u čvor možemo računati pozitivnima, a struje koje izlaze negativnima

Odabiremo
smjerove struja



Kirchhoffova pravila



2. Kirchhoffovo pravilo:

- Zbroj svih elektromotornih sila u zatvorenoj petlji jednak je zbroju svih padova napona na otporima:

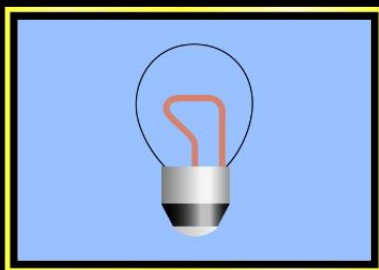
$$\sum_i \varepsilon_i = \sum_i I_i R_i$$

• PREDZNACI!

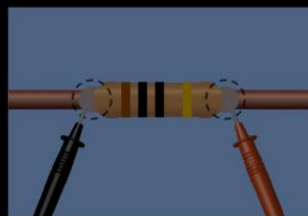
- Elektromotorna sila je pozitivna ako bi davala struju u odabranom smjeru obilaska petlje.
- Pad napona IR je pozitivan ako je smjer struje kroz taj otpor u smjeru obilaženja petlje.

Simulacija: Električni krugovi

Dizajniranje strujnih krugova



Uvod



Laboratorij

Rad i snaga električne struje

- Rad koji obavi električna sila koja djeluje na naboj dQ koji zbog razlike potencijala U prolazi vodičem duljine l

$$dW = EdQl = \frac{U}{l}ldQ = UdQ$$

- Snaga P koja se dovodi vodiču

$$P = \frac{dW}{dt} = U \frac{dQ}{dt} = UI \quad [P] = W$$

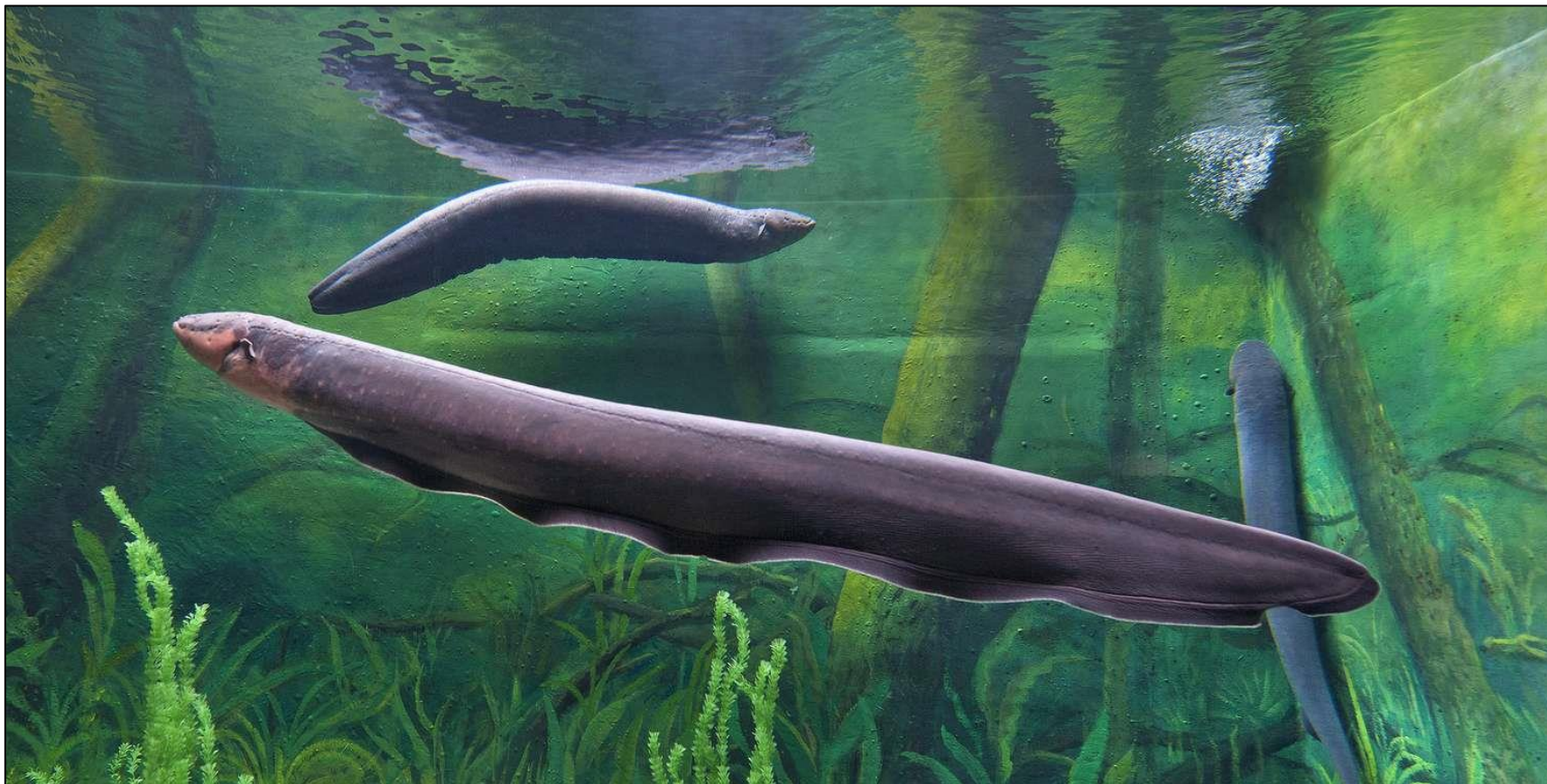
Ako za vodič vrijedi Ohmov zakon $U = IR$, dobijemo još dva izraza za snagu

$$P = \frac{U^2}{R} \quad P = I^2 R \quad \text{Jouleov zakon}$$



Franjo Hanaman





Električna jegulja - napon 650 V (AC)

Brachyhypopomus bennetti - slabe struje (DC)

Električni som, Crni duh, Sjeverni Stargazer